

TARTU ÜLIKOOL
Loodus- ja täppisteaduste valdkond
Tehnoloogiainstituut

Margo Martis

Takistusliku sensortalla 1.0 arendustöö ja testimine

Bakalaureusetöö (12 EAP)

Arvutitehnika erialal

Juhendajad:
PhD Tarmo Tamm
MSc Teet Tilk

Tartu 2018

Resümee

Käesoleva bakalaureusetöö eesmärgiks on luua sensortald, mis on võimeline igapäevastes tegevustes mõõtma tallale jagunevat rõhku ning reaajas kogutud andmed edastama nutiseadmele või kirjutama mälukaardile. Praktiline töö sisaldab sensortalla valmistamist, programmeerimist ja testimist.

Märksõnad: rõhuandur, ARM Cortex mikrokontroller, BLE, mälukaart, kiirendusandur

CERCS: T120, T150, T170

Abstract

The goal of the Bachelor's thesis is to create pressure-sensing insoles capable of measuring pressure in everyday activities and transfer real-time data via bluetooth to smart devices or write it to memory card. Practical work includes the manufacture, programming and testing of the insole.

Keywords: Pressure Sensor, ARM Cortex processor, BLE, Memorycard, Acceleration sensor

CERCS: T120, T150, T170

Sisukord

Lühendid, konstandid, mõisted	5
1. Sissejuhatus.....	6
1.1. Probleemi tutvustus.....	6
1.2. Töö eesmärk ja ülevaade	8
2. Valdkonna ülevaade.....	9
2.1. Turul olevad sensortallad	9
3. Metoodika	10
3.1. Sensortald	10
3.1.1. Rõhuandurite valik.....	10
3.1.2. Sensortalla materjalivalik	12
3.2. Elektroonika	14
3.2.1. Juhtplaat	14
3.2.2. Elektroonika komponendid.....	15
3.3. Tarkvara	20
3.3.1. Tarkvara arenduskeskkond	20
3.3.2. Tarkvara struktuur.....	22
Mõõtetulemused.....	25
Aeglane samm.....	25
Kiire samm.....	25
Kiirelt sammumiselt üleminek aeglasele 80 kg mehel	25
Kiirelt sammumiselt üleminek aeglasele 35 kg noormehel	26
Kokkuvõte.....	27
Kasutatud kirjandus	28
Lisad.....	32
Lisa 1 – Niidiga talla prototüüp	32
Lisa 2 – hõbetatud vasktraadiga talla prototüüp	33
Lisa 3 – Juhtplaadi skeem.....	34
Lisa 4 – Juhtplaadi joonis	35

Lisa 5 – Ühe mõõtepunkti võtmine.....	36
Lihtlitsents lõputöö reprodutseerimiseks ja lõputöö üldsusele kättesaadavaks tegemiseks	37

Lühendid, konstandid, mõisted

ADC – analoog-digitaalmuundur on seade, mis muudab sisendisse tuleva analoogsignaali digitaalsignaali.

ARM – (ingl *Advanced RISC Machine*) odava ja väikese energiakuluga 32-bitiste kärbitud käsustikuga protsessoriarhitektuur. [1]

API – (ingl *application programming interface*) ehk programmiliides on reeglistik, mille alusel rakendusprogramm kasutab teise rakendusprogrammi teenuseid. [1]

BLE – (*Bluetooth low energy*) madala voolutarvega *bluetooth* tehnoloogia.

Bluetooth – 1998. a. Ericssoni, Inteli, Nokia ja Toshiba koostöös välja töötatud mobiilside spetsifikatsioon, mis võimaldab lühikese vahemaa (10 m) kauguselt andmeid vahetada. [1]

JTAG – (ingl *Joint Test Action Group*) riistvaraline liides trükkplaatide programmeerimiseks, testimiseks ja silumiseks.

Demultiplekser – Seade, mis võimaldab kontrollviikudega valida mitme väljundsignaali seast ühe ja edastada seda sisendsignaalina.

Multiplekser – (ingl *multiplexer*) seade, mis võimaldab kontrollviikudega valida mitme sisendsignaali seast ühe ja edastada seda väljundsignaalina.

Multivibraator – Seade, mille väljund lülitub kahe oleku vahel.

Mälukaart – (ingl *memory card*) andmete salvestamiseks ja hoiustamiseks loodud väike andmekandja.

Neuropaatia – üldtermin, mis tähistab perifeerse närvi erinevatel põhjustel tekkinud kahjustust.

SPI – (ingl *Serial Peripheral Interface*) järjestiksuhtluse liidese standard, mis võimaldab kahe seadme vahelist andmete saatmist.

USB – (ingl *universal serial bus*) universaalne järjestiksiin.[1]

1. Sissejuhatus

Tänapäeval on suureks probleemiks kujunenud diabeet ehk suhkruhaigus. Selle üheks osaks on perifeerne neuropaatia, mille kõige sagedasema tunnusena tekivad jalgadele haavad ja hooletusse jättes nakkuslikud haavandid.

Lõputöö eesmärgiks on välja töötada sensortalla prototüüp, mis võimaldab tuvastada perifeerse neuropaatia sümptomina talla degeneratsiooni läbi talla aluse rõhuprofiili mõõtmiste. Praktilise töö käigus arendatakse välja sensortalla elektriline prototüüp, mis võimaldab rõhuprofiili mõõtmeid teostada, ladustada ning edastada välistele nutiseadmetele. Antud töö toetub Alar Kume bakalaureusetöö „Sensortalla juhtplaadi v.2.0 arendamine ja testimine“ [2] uurimusele.

1.1. Probleemi tutvustus

Rahvusvahelise Diabeediliidu (International Diabetes Federation IDF) andmetel mõjutab suhkrutõbi 422 miljonit inimest üle maakera ning umbes pooled neist ei pruugi teada, et nad on haiged [4-5]. Umbes kolme- kuni kuuekümmel protsendil diabeetikutest on probleemid närvisüsteemi või veresoontega, mida sagedamini esineb jalgades [5-6]. Diabeetilise neuropaatia kõige sagedasemat tüüpi nimetatakse perifeerseks neuropaatiaks. See kahjustab perifeerseid närve, mis lähtuvad seljaajust ning suunduvad lihastesse, siseorganitesse ning näärmetesse, rikub nende tundlike ning mootorsete närvide tööd. Diabeetiline neuropaatia võib viia jalalaba tundlikkuse kaotamiseni, sealhulgas võime tunda valu, soojust või külma. Tähelepanuta jätmisel on lisaks närvikahjustustele ka suur oht väiksete haavade tekkeks. Aja möödudes on haav peagi muutunud paranematuks nakkuslikuks haavandiks, mis omakorda soodustab jäsemete perifeeriliste osade nekrotiseerumist, mille tagajärjel ainus ravi on jäseme amputeerimine. Neuropaatia võib viia jalalaba raske deformeerumiseni ning varvaste kõverdumiseni. Diabeetikute jaoks on väga oluline rakendada vajalikke ennetusmeetmeid igasuguste kahjustuste ärahoidmiseks. [7]

Peamised mõõtmisel tuvastatavad neuropaatia tagajärjed

Tunnetuse kadu – Perifeerse neuropaatia korral tekivad informatsiooni tõlgendamise lahkkelid arvatava ja reaalse tallale rakendatava surve vahel. Selle tuvastamiseks on võimalik läbi viia mõõtmised surudes erineva jõuga elektrilise sensortalla piirkondadesse ja võrrelda mõõtetulemusi normaalsuse piiridega. Kui patsiendil on näha suuri kõrvalekaldeid normaalsuse piiridest, siis saavad arstid tegeleda taastusravi ja täpsema abistamisega.

Ohtlik surve – Suutmatus tunda jalgadele avaldatavat survet võib põhjustada tõsisemaid probleeme, eriti diabeetikutel. Mõõtmisel on selgelt näha silmatorkav kõrgem rõhk anduritel. Mõõtetulemustest on võimalik järeldada, kas rakendada ortopeedilist taldat või taastusravi.

Pöidade deformeerumine – jala kuju erinevus tavapärasest ning rõhu mõõtmine punktides peaks andma üsna täpse tagasiside, miks on jalg hakanud deformeeruma ja mis moel.

Haavandid – valu puhul proovivad inimesed alateadlikult valupunktist eemale hoiduda. Seega on tulemusi jälgides võimalik tuvastada, kui käimisel rakendatakse ühele või teisele jala poolele valust hoidumiseks rohkem survet ja eiratakse kindlale tallaosalale toetumist. Probleemi korduval tuvastusel saab anda kasutajale mõõteseadme poolt märguande, et jalga on vaja üle vaadata.

1.2. Töö eesmärk ja ülevaade

Töö eesmärk on luua takistuslik sensortald ja elektroonikaplaad, mis võimaldab alljärgnevaid funktsionaalsusi:

- elektroonika võimaldab reaajas bluetooth ühendamist ja andmete saatmist;
- võimaldab teostada mõõtmisi vähemalt viis korda sekundis ehk sagedusega 5 Hz;
- elektroonikaskeem võimaldab hallata kuni 256 andurit;
- töötab 3,3 V toiteahelas;
- toetab mälukaardi funktsionaalsust;
- võimaldab kiirendusanduriga tuvastada jala asendit maa suhtes.

Eesmärgi saavutamiseks on töö jagatud järgnevateks etappideks:

1. sensortalla andurite valimine ja talle disainimine;
2. elektroonikakomponentide võrdlemine ja valimine vastavalt soovitud funktsionaalsusele;
3. elektroonikaskeemi ja komponentide pakendite disainimine;
4. komponentide jootmine;
5. tarkvara arenduskeskkonna loomine ja juhtplaadi programmeerimine;
6. mõõtetulemuste kirjeldamine;

2. Valdkonna ülevaade

2.1. Turul olevad sensortallad

IEE

IEE on rahvusvaheline mõõtevahendeid arendav firma. Peamiseks valdkonnaks on ettevõttel autotööstus ning seal rakendatav autonoomsete mõõtevahendite arendamine, kuid tegeletakse ka spordivaldkonnas talla monitooringu vahendite loomisega. Seade koosneb elektroonikamoodulist ja takistuslikust tallast. Moodul kinnitub mõlemale jalanõule eraldi ja tegeleb andmete töötlustega. Andmete edastamiseks ja talletamiseks välistele seadmetele kasutatakse *bluetooth* ühendust. Tallade hinnad on firmal avalikustamata. [8]

Orpyx

Orpyx on ettevõtte, mis on keskendunud meditsiinivaldkonnale, sealhulgas suhkruhaigete monitooringuvahendite väljatöötamisele. Nende toode SurroSense Rx kasutab mõõtmiseks kaheksat jõuandurit, mis tallas paiknevad. Hinnaks on umbes 754€, mis sisaldab kahte taldat, elektroonikamoodulit, valmivat mobiilirakendust ja käekella. Tallade vahetus käib 6-18 kuu tagant ning ühe tallat vahetuse hind on 167€. [9]

Bebop Sensors

2016. aastal USA IDTechEx Wearable üritusest osavõttev idufirma Bebop Sensors tegeleb survetundlikele riidele andurite loomisega. Üritusel esitleti tallat, kindat ja matiandurite prototüüpe. Tallandurite loomisel kasutatakse spetsiifilist polümeeride kombinatsiooni, mis annab materjali kihile muutuvat takistust. Takistuse muutuse tuvastamiseks on tallale joonistatud juhtivat tindiga rajad, mida eelnevad ettevõtjad ei kasuta. Firma müüdavat toodet valmis ei ole saanud, kuid nende poolt spekulatsioonid tallat hind võiks jääda 250€ vahemikku. [10]

3. Metoodika

3.1. Sensortald

3.1.1. Rõhuandurite valik

Jalatala rõhu mõõtmise väljundiks on analoogsignaali, mis on võrdeline tallale rakenduva rõhuga. Tuntumad rõhuandurid põhinevad mahtuvuslikul, takistuslikul või piesoelektrilisel efektil.

Mahtuvuslikud andurid

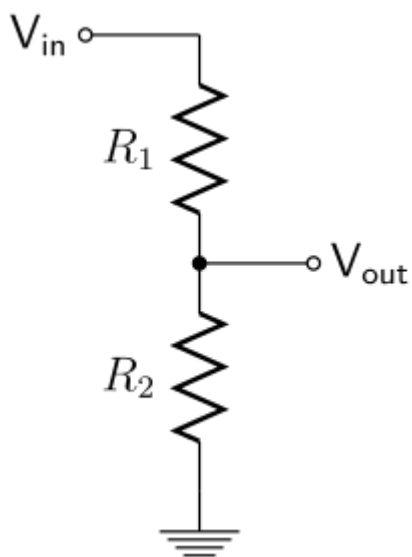
Mahtuvus kirjeldab, kuidas reageerivad pingemuutusele kaks juhtivat elektroodi, mis on teineteisest elektrilise isolaatoriga eraldatud. Isoleeritud ala moodustab kokkusurutav ja mittejuhtiv materjal. Pinge rakendamisel tekib tühja alasse elektriväli, kus ühel pool on positiivsed ja teisel pool negatiivsed osakesed. Mahtuvuslikud andurid kasutavad seejärel pinget, et panna laengud liikuma. Raskuse rakendamisega surutakse isoleeritud ala kokkupoole ja osakeste vaheline kaugus muutub. Kondensaatori mahtuvus suureneb. Anduri juurde on lisatud multivibraator, mis kondensaatori mahtuvuse muundab digitaalseks signaaliks. [2][11][12]

Takistuslikud andurid

Takistusel põhinevatest anduritest on üks populaarseid lahendusi räniga rikastatud materjalid, mis töötavad piesotakistuslikul efektil. Algasendis on takistus kõrge ning rõhu rakendamisel muutub elektrodide vahel oleva materjali eritakistus. [13-15]

Mõõtetulemuse analoogsignaali kujule teisenduseks kasutatakse andurit osana pingejagurist. Väljund- ja sisendpinge suhe on sõltuvuses anduri takistuse ja skeemi kogutakistuse suhtega.

$$V_{out} = V_{in} * \frac{R_2}{R_1 + R_2}$$



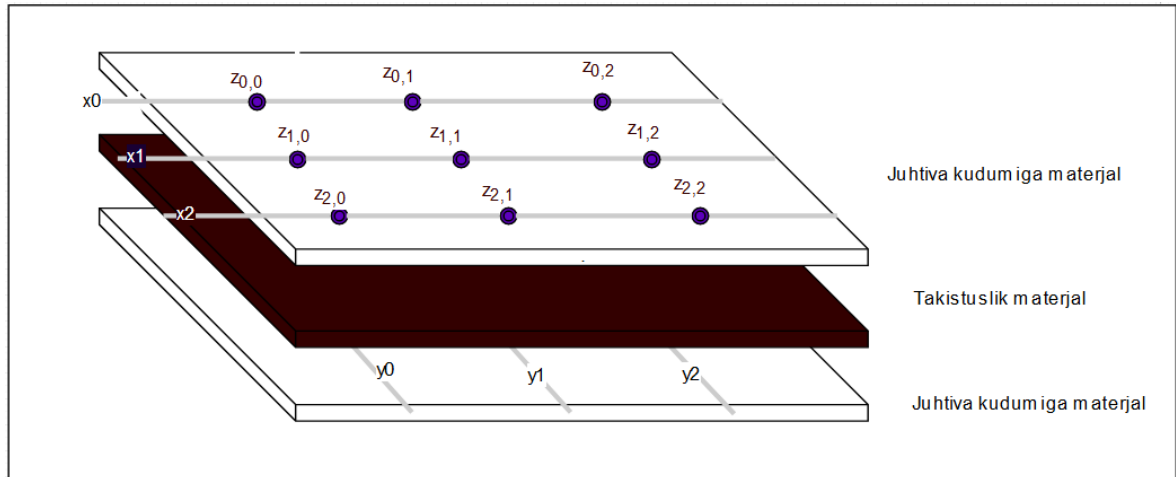
Joonis 2: Pingejaguri skeem, kus R_1 = sensor ja R_2 = staatiline takisti

Piesoelektrilised andurid

Sellistes andurites kasutatakse andurimembraaniga ühendatud ühe või mitme piesokristalli piesoelektrilist efekti. Kui membraan nihkub, siis piesokristall tekitab laengu, mis sõltub membraanile rakendatud rõhust. Piesoefektil põhinevatel anduritel on kõrge näivtakistus, mispärast on nad müra suhtes väga tundlikud. [11]

Piesoelektrilised rõhuandurid ei sobi disaini, sest neil on kõrge näivtakistus. Mahtuvusliku rõhuanduri puhul tuleb iga anduri juurde lisada multivibraator, mis tähendab tallas mõõdetavate punktide arvulist vähenemist. Antud põhjustel võeti kasutusele takistuslike rõhuandurite printsiip.

3.1.2. Sensortalla materjalivalik



Joonis 3: Talla läbilõige

Takistusliku vahekihi materjalivalik:

Takistusliku vahekihina võeti kasutusse firma ETRA poolt pakutav juhtiv silikoonkumm. Tellitud sai võrdluseks olemasolevale veel teine takistuslik kumm Hiinast, kuid see oma eesmärgi ei täitnud. Probleemiks oli juhtivus, mida olenemata toote infole ei eksisteerinud.

Tooted:

- Hiinast tellitud juhtiv vahekiht. [16]
- ETRA firmast tellitud juhtiv vahekiht.[17]

Juhtiva kudumi valik:

Kudumi valimisel on oluline järgnevate nõuete täitmine:

- kudum peab olema juhtiv terves materjali ulatuses;
- traadi valiku puhul ei tohi oksüdeeruda;
- ei tohi olla kergesti purunev;
- maksimaalselt 0,2 mm läbimõõduga.

Testimiseks sai tellitud hõbetatud vasktraat [18] ja juhtiv niit [19]. Mõlemad kudumid olid sobilikud signaali edastamiseks, kuid omasid problemaatilisi etappe sensortalla valmistamisel.

Juhtiva niidi puhul oli riidesse radade õmblemise protsess väga edukas. Seda tööd sai teha kodustes tingimustes õmblusmasinaga. Probleeme tekitas niidi ja juhtplaadi ühendamine, sest niit oli tina hülgav. Näidis antud eksemplarist on toodud lisas 1.

Hõbetatud vasktraadiga oli täpselt vastupidi. Kudumise etapp oli tülikas, sest riie ei haakunud traadiga. Koomise protsess võttis aset Haine Paelavabrikus, kus oli materjali koomiseks sobiv masin. Sellegi poolest oli materjali kadu suur. Võrreldes aga juhtplaadi ja traadi omavaheliste ühenduste loomist, oli protsess väga lihtne, sest vasktraati sai tinaga joota juhtplaadi külge.



Joonis 4: Hõbetatud vasktraadi õmbluse tulemus

3.2. Elektroonika

3.2.1. Juhtplaat

Juhtplaadi eesmärgiks on mõõta sensortalla sensoritel olevat pinget, muuta see digitaalseteks signaaliks ja seejärel mälukaardile või bluetooth ühendusega välisele seadmele edastada. Juhtplaat kasutab demultiplekserit, mille kontrolliviikudega valib millisele sensortalla reale rakendada pinge. Seejärel, kui pinge on sensortalla reale rakendunud ja talda läbinud, valitakse multiplekseri lülitusi tehes veerud ning loetakse ükshaaval veergudest tulev elektriline signaal. Veeu ja rea ristlõikepunktis olev pinge muundatakse ADC-d kasutades digitaalseks 16 bitiseks muutujaks ning lisatakse andmehulka. Sedasi loogikalülitusi kasutades käiakse läbi kõik talla read ja veerud. Moodustub andmehulk talla rõhu mõõtmest erinevatel anduritel, mis kirjutatakse mälukaardile ja ühenduse olemasolul edastatakse välisele bluetooth seadmele. Juhtplaadi elektroonikaskeem ja plaadi joonis on toodud lisa 2 ja 3.

3.2.2. Elektroonika komponendid

Mikrokontroller

Mikrokontroller valikul on oluline talle funktsionaalsuse täitmine ja nõuete rakendamine. Vastasel juhul tekib erinevates töötappides kitsaskohti ja ei jõuta mõõtetulemusteni.

Nõuded:

- talle madal voolutarve – tööolekus vajab maksimaalselt 3,3 volti ja tarbib 0,4 mA;
- omab vähemalt 23 viiku teiste juhtplaadil olevate komponentidega suhtlemiseks. (BLE, multiplekser, demultiplekser, kiirendusandur, mälukaardi pesa);
- võimalikult madal ja väikeste mõõtmetega komponent – ei tohi olla kõrgem kui 2 mm ja laiuselt suurem kui 10 mm;
- vähemalt 10 bitine ADC – võimaldab kirjeldada ühte lugemist arvuvahemikuks 1 kuni 1023, et saada täpne mõõtetulemus.

Tabel 1. Mikrokontrollerite omaduste võrdlus

Tootja	Texas Instruments	STMicroelectronics	Atmel	Silicon Labs
Mudel	MSP430 [20]	STML053 [21]	ATMEGA164P- 20AU [22]	C8051F96x [23]
Toitepinge	1,8-3,6 V	1,65-3,3 V	2,7-5,5 V	3,6 V
Voolutarve tööolekus(1 MHz taktsagedusel)	230 µA	88 µA	400 µA	130 µA
Voolutarve puhkeolekus	0,1 µA	0,27 µA	0,1 µA	0,12 µA
Taktsagedus	16 MHz	32 MHz	20 MHz	24,5 MHz
ADC olemasolu	10 bitine(8x)	12 bitine(16x)	10 bitine (8x)	12 bitine(16x)
I/O	24	51	32	34

Mõõtmistulemuste lugemise puhul on oluline, et mõõdetav number oleks võimalikult täpselt kirjeldatud, seega eelistusse läksid 12 bitise analoog-digitaal muunduriga kontrollid. Võrreldes kahte järelejäänud valikut C8051F96x ja STM32L053 valiti toitepinge reguleerimise ja kättesaadavuse põhjusel 32 bitine STM32L053R8. Tööolekus on pingevahemik 1,65-3,3 V ja voolutugevus alla 1 mA. Mõõtmisel on komponent 1,2 mm kõrge ja laiuselt 10 mm. Komponenti viikudest on kasutatavad 51 viiku, mis annab laialdase valiku erinevate funktsionaalsuste rajamiseks.

Bluetooth

Bluetooth on tänapäeval üks populaarsemaid juhtmevabasid välise seadmetega suhtlemise tehnoloogiaid. Tema edasiarendus, BLE, võimaldab madala voolutarbega andmete vahetamist. Voolutarbe vähenemine saavutatakse režiimide vahetusel. Hetkel, mil andmeid ei saadeta, on seade puhkerežiimis ja kui andmeedastus initsialiseeritakse, lülitub seade ümber töörežiimi. Selleks, et BLE tehnoloogiat kasutada, peab välistel seadmetel nagu tahvelarvutil või telefonil olema *bluetoothi* versioon vähemalt 4.0. Mõlemad tehnoloogiad opereerivad 2,4 GHz taktsagedusel. [24]

Nõuded:

- komponent peab võimaldama BLE tehnoloogiat;
- komponent peab olema seadistatav läbi valitud STM32L053 mikrokontrolleri. Tegu ei tohi olla eraldi mikrokontrolleriga, mis võimaldab *bluetooth* ühendust.

Erinevaid bluetoothi lahendusi oli mitmeid, kuid nõuetele vastasid järgnevad kaks kiipi, sest neil ei olnud eraldi integreeritud protsessorit.[25]

Tabel 2. BLE kiipide omaduste võrdlus

Tootja	Texas Instruments	Nordic Semiconductor
Mudel	CC256x[26]	nRF8001[27]
Toitepinge	1,9-3,3 V	2,2-4,8 V
Voolutarve puhkeolekus	2 mA	4 mA
Voolutarve Tööolekus	38,4-39,2 mA	12,7-14,6 mA

Valituks osutus madala voolutarve näitajate tõttu Nordic Semiconductori kiip nRF8001.

Bluetoothi andmeedastuskiirus

Töö testimise käigus tuli välja ka nõuetesse rakendamata teave, mis antud elektroonika disainimisel on oluline teada.

Bluetooth suudab ühte paketti edastada 30 ms intervalliga. Ühe paketi saatmisel on maksimaalne edastatav andmemaht 20 baiti, mida seade lubab korraga saata. Andmeedastuskiiruseks saame 0,67 Mbps, mis suurte andmemahtude edastamisel võib aeglaseks jääda.

Mälukaardipesa

Lisafunktsionaalsusena sai andmete hoidmiseks ja arhiveerimiseks lisatud juhtplaadile mälukaardipesa, kuhu lisamälu paigutada. Valituks osutus TFCMF-20801B0T0-UTE oma kompaktsuse ja universaalsuse tõttu. Sarnast pesa kasutatakse enamikes telefonides mälukaardi hoidmiseks, et telefoni integreeritud mälule andmemahtu juurde saada.

Demultiplekser

Talla mitmele rajale pinge rakendamiseks läbi võimalikult väheste mikrokontrolleri viikude võtsime kasutusele demultiplekseri.

Nõuded:

- omab 16 väljundkanalit;
- peab töötama toitepingega 3,3V.

Selliste nõuetega eksisteerivaid multipleksereid oli kaks.

Tabel 3. Demultiplekserite omaduste võrdlus

Tootja	Texas Instruments	Texas Instruments
Mudel	CD74HC4067M[28]	CD74HC4067M96[29]
Toitepinge	2-6 V	2-6 V
Takistus	90 Ω	180 Ω

Kasutusse võeti väiksema takistusega komponent CD74HC4067M. Kuna antud valik sai tehtud Farnelli leheküljel pakutavate toodete põhjal, siis antud komponendi kõrgus 2,65 mm sobis prototüübil rakendamiseks, kuid pikas perspektiivis peaks komponent madalam olema.

Multiplekser

Tallalt tulevate signaalide lugemiseks sai juhtplaadile rakendatud multiplekser.

Nõuded:

- Analoog multiplekser – Tallalt saadavad analoog väärtused tuleb edasi kanda kontrolleri analoog-digitaal muundurile võimalikult täpselt, seega digitaal muundur, mis suudab edastada ainult kõrget ja madalat loogikanivood juhtplaadile ei sobi.
- peab võimeline haldama 16 kanalit.
- peab töötama toitepingega 3,3V.
- komponendi takistus on alla 100 Ω
- komponendi kõrgus peab olema võimalikult madal.

Tabel 4. Multiplekserite näitajate võrdlus

Tootja	Analog Devices	Maxim Integrated Products	Texas Instruments
Mudel	ADG706BRUZ[30]	MAX396CWI [31]	CD74HC4067M[29]
Toitepinge	1,8-5,5V	2,7-16V	2-6 V
Takistus	2,5 Ω	60 Ω	180 Ω
Komponendi kõrgus	1,10 mm	4,4 mm	2,65 mm

Kasutusse läks madala kõrguse ja takistuse poolest Analog Devices toodetud ADG706BRUZ analoog multiplekser.

Kiirendusandur

Jala asendi tuvastamiseks ning liikumiskiiruse mõõtmiseks on tallale lisatud kiirendusandur. Anduri võimekus mõõta koordinaattelje suhtes liikuva keha lineaarset kiirendust annab üsna täpse ülevaate, mis asendis jalg on. Anduri funktsionaalsus võimaldab ka voolutarvet vähendada, lülitades jala õhus olemise ajal kontrolleri puhke olekusse, kus energia tarbimine on kordades väiksem.

Nõuded:

- toetab kolmemõõtmelist mõõtmist;
- töötab 3,3V toitepingel;
- võimaldab katkestusi.

Tabel 5. Kiirendusandurite näitajate võrdlus

Tootja	NXP	KINOX	Analog Devices
Mudel	MMA8452Q [32]	KX022-1020 [33]	ADXL335BCPZ [34]
Toitepinge	1,95-3,6 V	1,8-3,6V	1,8-3,6V
Voolutarve tööolekus	6 μ A - 165 μ A	150 μ A	350 μ A
Suhtluskiirus	800 Hz	1800 Hz	1600 Hz
Komponendi kõrgus	1 mm	0,9 mm	1,5 mm

Kuna NXP toodetud MMA8452Q kiirendusandurid olid Tartu Ülikoolil olemas ning vastasid soovitud nõuetele, siis ei tellitud teisi, vaid võeti need kasutusse.

3.3. Tarkvara

3.3.1. Tarkvara arenduskeskkond

Koodi haldamiseks on arenduskeskkonnana kasutusele võetud Atom vabavara [35], versioonihalduseks GIT [36] ja riistvara abstraktsiooni kihina raamistik MBed. Tarkvara kompileerimiseks kasutatakse arm-none-eabi tööriistapaketti, täpsemalt programme g++, gdb, ld, objcopy. Programmi kompileerimise seadistus sai genereeritud veebikeskkonna MBed tööriista eksport funktsionaalsuse läbi. Kompileerimise tulemusena tekivad .elf, .hex ja .bin failid, mida mikroprotsessorile STM32L053R8 saab ST-Link V2 USB programmaatorit kasutades peale laadida. Programmaatori kontrollimiseks on openocd programm, mis lubab protsessori JTAG'iga liidestada arm-none-eabi-gdb debugger sessiooni.

Mbed OS

Mbed OS on vabavaraline avatud lähtekoodiga keskkond veebipõhiseks ARM Cortex-M mikrokontrolleri projektide arenduseks. Keskkond pakub erinevaid näiteid ning funktsionaalsusi draiverite, andurite, I/O seadmete, ühendusliideste implementeerimiseks. Lisaks koodi redigeerimisele võimaldab keskkond ka koodi mikrokontrolleritele kompileerida. [37]

Arenduskeskkonnas tekkinud probleemid:

- MBed veebikeskkonnas kompileeritud koodi laadimisel mikrokontrollerile tekib pinu ületäitumise veateade, mis näitab, et kood ei mahu kontrolleri limiteeritud mälusse.
- Koodi kompileerimisel jääb protsess poolikusse seisu, mille tulemusena kompileeritud faili ei tekigi. Selline olukord võib kesta terve päeva.

Lahenduseks kasutati Mbed eksport funktsionaalsust ning kompileerimiseks arm-none-eabi. See võimaldas koodi kompileerimise ja mikrokontrollerile pealelaadimise protsessi optimeerida. Tulemusena on võimalik antud lõputöö koodi 10 sekundi jooksul kompileerida ja mikrokontrollerile peale laadida.

GNU Arm Embedded Toolchain (arm-none-eabi)

GNU Arm Embedded Toolchain koosneb integreeritud ja valideeritud pakettidest, mis pakuvad kompileerimise, teekide ja teiste GNU tööriistade kasutamise võimalust Arm Cortex-M ja Cortex-R protsessorite arendamiseks. Täpsemalt toetatakse Arm Cortex-M0, Cortex-M0+, Cortex-M3, Cortex-M4, Cortex-M7, Cortex-M23, Cortex-M33, Cortex-R4, Cortex-R5, Cortex-R7 ja Cortex-R8 protsessoreid. Antud tööriista on võimalik kasutada Linux, Mac OS X ja Windowsi operatsioonisüsteemides. [38]

Kasutuse näited:

- `arm-none-eabi-g++ *.c -o *.o -mcu=STM32L0`
- `arm-none-eabi-objcopy -I ihex --output-target=binary SDSusi.hex SDSusi.bin`

Open On-Chip Debugger (openocd)

OpenOCD on Dominic Rathi diplomitöö raames loodud programm, mis pakub JTAG liidestust. See funktsionaalsus annab võimaluse lihtsasti protsessorile koodi laadida ning siluda. [39]

Kasutuse näited:

- `openocd -f interface/stlink-v2.cfg -f target/stm32l0.cfg` – käsuga tekib JTAG liidestus protsessori ja ST-Link V2 USB adapteri vahel.

```

Terminal - cube@cube: ~/Projects/SDSusi/scr
File Edit View Terminal Tabs Help
Open On-Chip Debugger 0.10.0+dev-00360-gffd6b78a (2018-03-18-14:45)
Licensed under GNU GPL v2
For bug reports, read
    http://openocd.org/doc/doxygen/bugs.html
WARNING: interface/stlink-v2.cfg is deprecated, please switch to interface/stlink.cfg
Info : auto-selecting first available session transport "hla_swd". To override use 'transport select <transport>'.
adapter speed: 300 kHz
adapter_nsrst_delay: 100
Info : The selected transport took over low-level target control. The results might differ compared to plain JTAG/SWD
none separate
Info : Listening on port 6666 for tcl connections
Info : Listening on port 4444 for telnet connections
Info : Unable to match requested speed 300 kHz, using 240 kHz
Info : Unable to match requested speed 300 kHz, using 240 kHz
Info : clock speed 240 kHz
Info : STLINK v2 JTAG v25 API v2 SWIM v4 VID 0x0483 PID 0x3748
Info : using stlink api v2
Info : Target voltage: 3.211002
Info : stm32l0.cpu: hardware has 4 breakpoints, 2 watchpoints
Info : Listening on port 3333 for gdb connections

```

Joonis: 5: OpenOCD käsuga JTAG liidestuse tekitamine

- telnet localhost 4444 – luuakse ühendus arvuti ja openocd vahel, mis võimaldab protsessorile järgnevaid käske saata.
 - `reset halt`
 - `flash write_image erase Susi.bin 0x08000000`
 - `reset run`

3.3.2. Tarkvara struktuur

Tarkvara struktuuri peamooduliks on rakendusliides ehk API, kus kasutatakse teiste alamprogrammide protsesse ja initsialiseerimisi. Alammooduleid on kolm – sensortalla loomismoodul, kommunikatsioonimoodul ning arhiveerimismoodul.

Sensortalla loomismoodul

Selles moodulis kasutatakse multiplekserit ja demultiplekserit. Mooduli initsialiseerimises defineeritakse talla struktuur. Protsessi käigus täidetakse struktuur 16 bitiste väärtustega, mis kirjeldavad rea ja veeru ristumispunktist rakendatud rõhku.

Rea valimise funktsioon võtab sisendiks rea numbri. Valides näitena kümnenda rea, saadetakse funktsiooni täitmisel sisendiga kümme antud komponendi kontrollviikude porti mask kujul 0xA ja demultiplekseri kümnes kanal muutub valituks. Valitud kanalile rakendub seejärel demultiplekseri sisendsignaal, milleks on 3,3 V. Pinge läbib talla ning suundub edasi

multiplekseri väljunditesse. Multiplekseri ümberlülitamisega valitakse järgnevalt väljundid ehk veerud ning kantakse ükshaaval talda läbinud analoogsignaale protsessorile. Protsessori ADC-d kasutades muudetakse analoogsignaali 16 bitiseks väärtuseks. Sedasi saadakse hulk mõõtmekäike ühel real. Jätkatakse järgneva reaga, kuni kõik read on läbi käidud. Mooduli tulemina valmib talle mõõtetulemuste maatriksi andmepakett, mida teistes moodulites kasutatakse. Joonis on toodud lisas 3.

Kommunikatsioonimoodul

Kommunikatsioonimooduli eesmärgiks on loodud andmehulk edastada nutiseadmele. Selleks on kasutusele võetud MBed keskkonnas kättesaadav teek BLE_nRF8001[40], kus on eelkirjeldatud riistvara seadistused komponendi NRF8001 töötamiseks.

Esmalt defineeritakse koodis mikrokontrolleri ja BLE seadme viigud ning andmeedastus liidese standard, mis selles moodulis on SPI. Seejärel käivitatakse initsialiseerimise funktsioon.

Initsialiseerimine

Häälestatakse GATT profiil, mis defineerib ära seadme hierarhilise struktuuri. Struktuuri luuakse teenused, karakteristikud, mida kasutatakse andmete lugemis või kirjutamise kasutamiseks. [41]

Näide koodist.

```
/* ----- BLE NRF8001 -----  
  
BLEperiferal l_BLEPeripheral = BLEPeripheral(&BLE_REQ, &BLE_RDY, NULL);  
BLEperiferal l_BLEService = BLEService("713d0001503e4c75ba943148f18d941e");  
  
BLECharacteristic txCharacteristic =  
    BLECharacteristic("713d0002503e4c75ba943148f18d941e", BLENotify, 20);  
BLECharacteristic rxCharacteristic =  
    BLECharacteristic("713d0003503e4c75ba943148f18d941e", BLEWrite, 20);  
  
l_BLEPeripheral.setLocalName("NRF8001");  
l_BLEPeripheral.setAdvertisedServiceUuid("713d0000503e4c75ba943148f18d941e");
```

```
l_BLEPeripheral.addAttribute(l_BLEService);  
l_BLEPeripheral.addAttribute(rxCharacteristic);  
l_BLEPeripheral.addAttribute(txCharacteristic);  
l_pBLEPeripheral.begin();
```

```
*/ ----- BLE NRF8001 -----
```

Protsess

Funktsioonis pöördatakse teise bluetooth seadme poole, et kahe seadme vahelist ühendust tekitada. Ühenduse olemasolul saab teises seadmes valida, millist lugemise või kirjutamise atribuuti kasutada. Nüüd saab andmeedastus alata.

Arhiveerimismoodul

Arhiveerimismooduli keskmeks on komponendid mälukaardilugeja ja protsessor. Mooduli aluseks on võetud teek SDFFileSystem[42], mida kasutatakse komponentide vahelise suhtluse loomiseks. Suhtlusliidese standardiks on SPI.

Moodulist kasutatakse koodis kolme pealmist käsku.

- mkdir – mälukaardi failisüsteemi kataloogide loomise käsk.
- fopen – failisüsteemis oleva faili avamise käsk.
- fprintf – Sõnade vastavalt valitud voogu kirjutamise käsk.

Mõõtetulemused

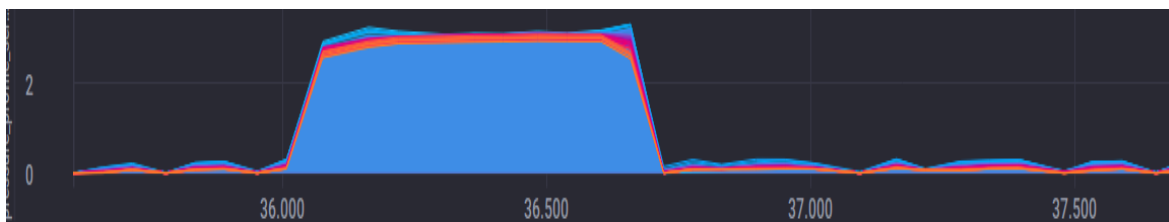
Andurite testimiseks mõõdeti 80 ja 34 kilose noormehe aeglast ja kiiret sammu. Tulemusi analüüsides on tuvastatav, kuna samm tehti ja milline samm oli, kuid andurid ei võimalda erinevat raskust eristada. Selleks tuleks antud prototüüpi edasi arendada ning keskenduda rohkem talla materjalide analüüsimisele ning testimisele.

Aeglane samm



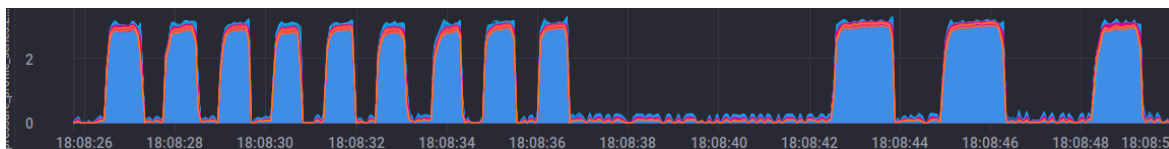
Joonis 6: aeglasel sammumisel pingemuutus ajas

Kiire samm



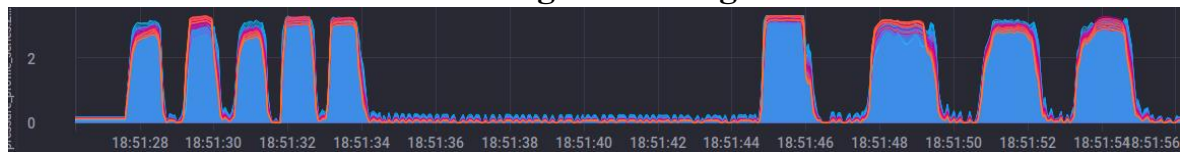
Joonis 7: kiirel sammumisel pingemuutus ajas

Kiirelt sammumiselt üleminek aeglasele 80 kg mehel



Joonis 8: 80 kilose noormehe rõhu rakendamisel tekitatud pingemuutus ajas

Kiirelt sammumiselt üleminek aeglasele 35 kg noormehel



Joonis 9: 35 kilose noormehe rõhu rakendamisel tekitatud pinge muutus ajas

Kokkuvõte

Käesolev bakalaureusetöö kirjeldab jala rõhuprofiili mõõtmisteks tehtud sensortalla ja juhtplaadi arendamistööd.

Töö käigus:

1. disainiti uue elektroonikaga juhtplaat ning programmeeriti see. Juhtplaat võimaldas saata andmeid üle SPI ühenduse mälukaardile või bluetooth seadmele. 36 takistusliku anduri lugemi mõõtmise ja mälukaardile kirjutamise kiiruseks saavutati 40 Hz.
2. loodi ülevaade projekti programmeerimiskeskonnast, mida tulevased tudengid saavad teiste ARM Cortex protsessori projektide tegemisel kasutada;
3. Disainiti kaks talla eksemplari, millest ühega teostati mõõtmised. Mõõtmiste analüüsimisel on tuvastatavad erinevad sammud, seismine ja talla puhkeasend, kuid eraldi andurite omavahelise analüüsimiseni töös ei jõutud.

Töö autor õppis programmeerima ARM tehnoloogiaga protsessorit ning looma selle ümber programmeerimiskeskonda. Lisaks omandati teadmisi BLE tehnoloogia ja elektroonika plaadi disainimise kohta.

Kasutatud kirjandus

1. Vallaste e-teatmik [Võrgumaterjal] [Vaadatud: 24. märts 2016] <http://www.vallaste.ee/>
2. A. Kume „[SENSORTALLA JUHTPLAADI V.2.0 ARENDAMINE JA TESTIMINE](#)“, bakalaureusetöö, Tartu Ülikool(2015)
3. Kliinik.ee tervisenõustamise keskkond [Võrgumaterjal] [Vaadatud: 24. mai 2016] https://www.kliinik.ee/haiguste_abc/neuroloogia/id-1209
4. International Diabetes Federation [Võrgumaterjal] [Vaadatud: 24. mai 2016] <https://www.idf.org/>
5. World Health Organisation [Võrgumaterjal] [Vaadatud: 15. mai 2018] <http://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/diabetes>
6. B. C. Callaghan, A. A. Little, E. L. Feldman, R. A. Hughes. „Enhanced glucose control for preventing and treating diabetic neuropathy“ [Võrgumaterjal] [Vaadatud: 24. mai 2016] <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC4048127/>
7. OÜ Reabilitatsioonibi [Võrgumaterjal] [Vaadatud: 15. mai 2018] <http://www.abivahendid.ee/diabeet-ja-jalg/>
8. IEE [Võrgumaterjal] [Vaadatud: 08. mai 2018] https://www.iee.lu/media/5746f180dbde2_160526-fs-smartfootsensor-web.pdf
9. Orpyx [Võrgumaterjal] [Vaadatud: 08. mai 2018] <https://www.imedicalapps.com/2012/07/orpyx-body-sensor-diabetics-prevent-foot-ulcers/#>
10. Bebopsensors [Võrgumaterjal] [Vaadatud: 08. mai 2018] <https://www.bebopsensors.com/about/>
11. A. H. A. Razak, A. Zayegh, R. K. Begg, Y. Wahab „Foot Plantar Pressure Measurement System“ [Võrgumaterjal] [Vaadatud: 30. märts 2016] <http://www.mdpi.com/1424-8220/12/7/9884>
12. Lion Precision „Capacitive Sensor Operation and Optimization“ [Võrgumaterjal] [Vaadatud: 30. märts 2016] <http://www.lionprecision.com/tech-library/technotes/cap-0020-sensor-theory.html>
13. Hans „Force Sensing Resistors“ [Võrgumaterjal] [Vaadatud: 10. juuni 2016] <http://at.or.at/hans/misc/itp/pcomp/fsr.html>
14. Standfordi Ülikool „Sensors“ [Võrgumaterjal] [Vaadatud: 10. juuni 2016] <https://ccrma.stanford.edu/wiki/Sensors>

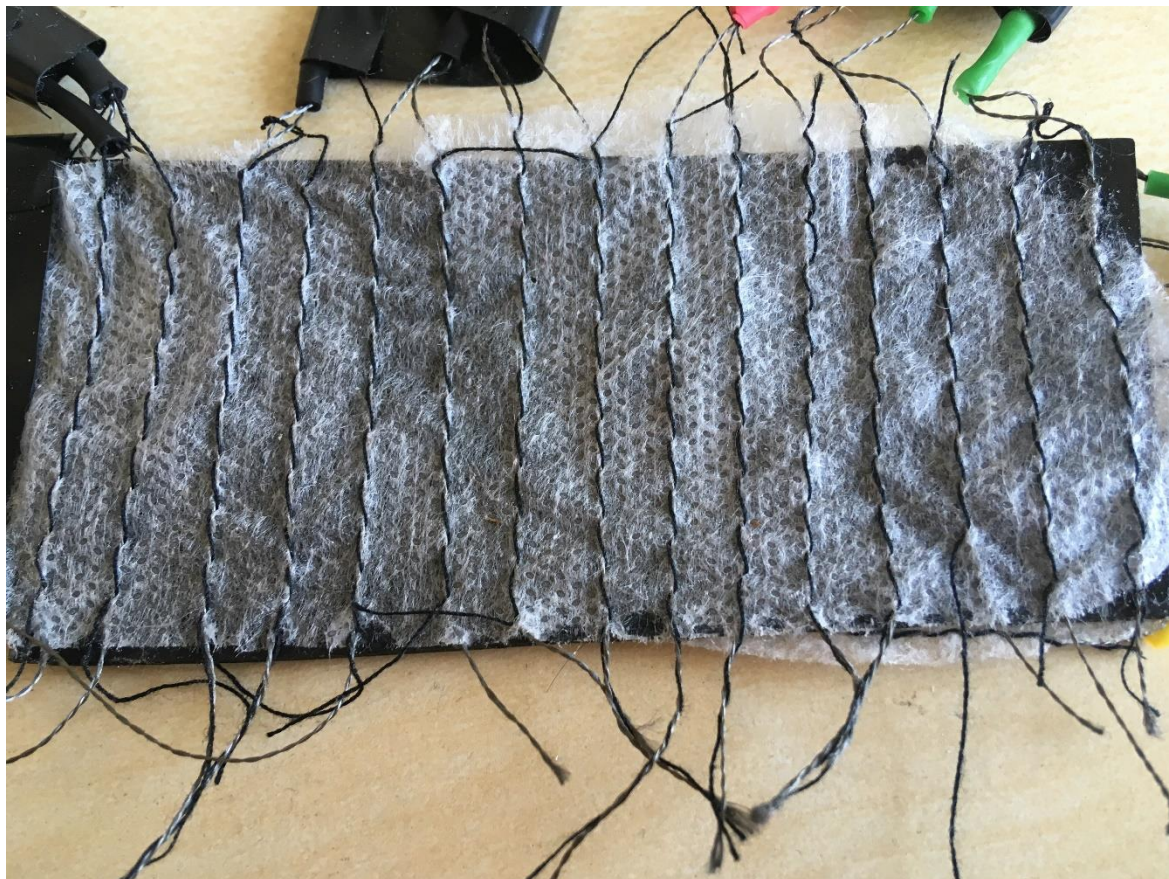
15. M. Appo ["ROBOTMANNEKEENI KATTELE RÕHUTUNDLIKUSE LISAMINE VÕIMALUSTE UURIMINE"](#), Bakalaureusetöö, Tartu Ülikool(2015)
16. Ebay Conductive Silicon [Võrgumaterjal] [Vaadatud: 30. märts 2016]
http://vi.vipr.ebaydesc.com/ws/eBayISAPI.dll?ViewItemDescV4&item=181584955956&t=1409756428000&tid=10&seller=fanty_store&excSoj=1&excTrk=1&lsite=0&itenable=false&domain=ebay.com&descgauge=1&cspheader=1&oneClk=1&secureDesc=0&oversion=103b05d2
17. Etra materjalide valik [Võrgumaterjal] [Vaadatud: 30. märts 2016]
<http://tuotteet.etra.fi/fi/g2650374/kumimatot>
18. 299/1 SV005 juhtiv vasktraat [Võrgumaterjal] [Vaadatud: 10. märts 2016]
<http://ee.farnell.com/alpha-wire/299-1-sv005/wire-bus-bar-26awg-30-5m/dp/1302721?st=Wire,%20Unjacketed,%2026%20AWG>
19. Conductive thread [Võrgumaterjal] [Vaadatud: 10. märts 2016]
<https://www.ebay.com/itm/Adafruit-2-Ply-stainless-thin-conductive-thread-2-ply-23-meter-76-ft/262341198280?hash=item3d14c101c8:g:s18AAOSwAghaqFSH>
20. Texas Instruments MSP430 [Võrgumaterjal] [Vaadatud: 20. märts 2018]
<http://www.ti.com/lit/ds/symlink/msp430g2453.pdf>
21. STMicroelectronics STM1053R8 [Võrgumaterjal] [Vaadatud: 20. märts 2018]
<http://www.st.com/resource/en/datasheet/stm32l053r8.pdf>
22. Atmel ATMEGA164P-20AU [Võrgumaterjal] [Vaadatud: 20. märts 2018]
http://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/Atmel-42742-ATmega164P_Datasheet.pdf
23. Silicon Labs C8051F96x [Võrgumaterjal] [Vaadatud: 20. märts 2018]
<https://www.silabs.com/documents/public/data-sheets/C8051F96x.pdf>
24. Bluetooth vs BLE [Võrgumaterjal] [Vaadatud: 20. märts 2018] <https://www.link-labs.com/blog/bluetooth-vs-bluetooth-low-energy>
25. Bluetoothi valimise juhend [Võrgumaterjal] [Vaadatud: 20. märts 2018]
<http://www.argenox.com/bluetooth-low-energy-ble-v4-0-development/library/a-guide-to-selecting-a-bluetooth-chipset/>
26. Texas Instruments CC256x [Võrgumaterjal] [Vaadatud: 20. märts 2018]
<http://www.ti.com/lit/ds/symlink/cc2560b.pdf>
27. Nordic Semiconductor NRF8001 [Võrgumaterjal] [Vaadatud: 20. märts 2018]
https://www.nordicsemi.com/kor/content/download/2981/38488/file/nRF8001_PS_v1.3.pdf

28. Texas Instruments CD74HC4067M [Võrgumaterjal] [Vaadatud: 20. märts 2018]
<http://ee.farnell.com/w/search?st=16%3A1%20demultiplexor&supply-voltage-range=2v-to-6v>
29. Texas Instruments CD74HC4067M96 [Võrgumaterjal] [Vaadatud: 20. märts 2018]
<http://www.ti.com/lit/ds/symlink/cd74hc4067.pdf>
30. Analog Devices ADG706BRUZ [Võrgumaterjal] [Vaadatud: 20. märts 2018]
http://www.farnell.com/datasheets/2042296.pdf?_ga=2.259715914.137906470.1524386345-1027682381.1524386345&_gac=1.49073170.1524389032.EAIAIQobChMI0_zy0sfN2gIVDh0YCh2rIwHYEAAYASAAEgK6jvD_BwE
31. Maxim Integrated Products MAX396CW1 [Võrgumaterjal] [Vaadatud: 20. märts 2018]
http://www.farnell.com/datasheets/2345056.pdf?_ga=2.157317242.137906470.1524386345-1027682381.1524386345&_gac=1.208913702.1524389032.EAIAIQobChMI0_zy0sfN2gIVDh0YCh2rIwHYEAAYASAAEgK6jvD_BwE
32. NXP MMA8452Q [Võrgumaterjal] [Vaadatud: 20. märts 2018]
<https://www.nxp.com/docs/en/data-sheet/MMA8452Q.pdf>
33. KINOX KX022[Võrgumaterjal] [Vaadatud: 20. märts 2018]
http://www.farnell.com/datasheets/1859095.pdf?_ga=2.64704424.682567232.1524390483-423118371.1524390483
34. Analog Devices ADXL335BCPZ [Võrgumaterjal] [Vaadatud: 20. märts 2018]
http://www.farnell.com/datasheets/2258652.pdf?_ga=2.73229972.682567232.1524390483-423118371.1524390483
35. Atom [Võrgumaterjal] [Vaadatud: 12. mai 2018] <https://atom.io/>
36. Git [Võrgumaterjal] [Vaadatud: 12. mai 2018] <https://git-scm.com/>
37. Mbed OS [Võrgumaterjal] [Vaadatud: 12. mai 2018]
<https://www.mbed.com/en/platform/mbed-os/>
38. GNU Toolchain [Võrgumaterjal] [Vaadatud: 12. mai 2018]
<https://developer.arm.com/open-source/gnu-toolchain/gnu-rm>
39. OpenOCD [Võrgumaterjal] [Vaadatud: 12. mai 2018]
<http://openocd.org/doc/html/About.html>
40. BLE API [Võrgumaterjal] [Vaadatud: 20. märts 2018]
https://os.mbed.com/teams/RedBearLab/code/nRF8001_SimpleChat/
41. GATTi ülevaade [Võrgumaterjal] [Vaadatud: 18. mai 2018]
<https://www.bluetooth.com/specifications/gatt/generic-attributes-overview>

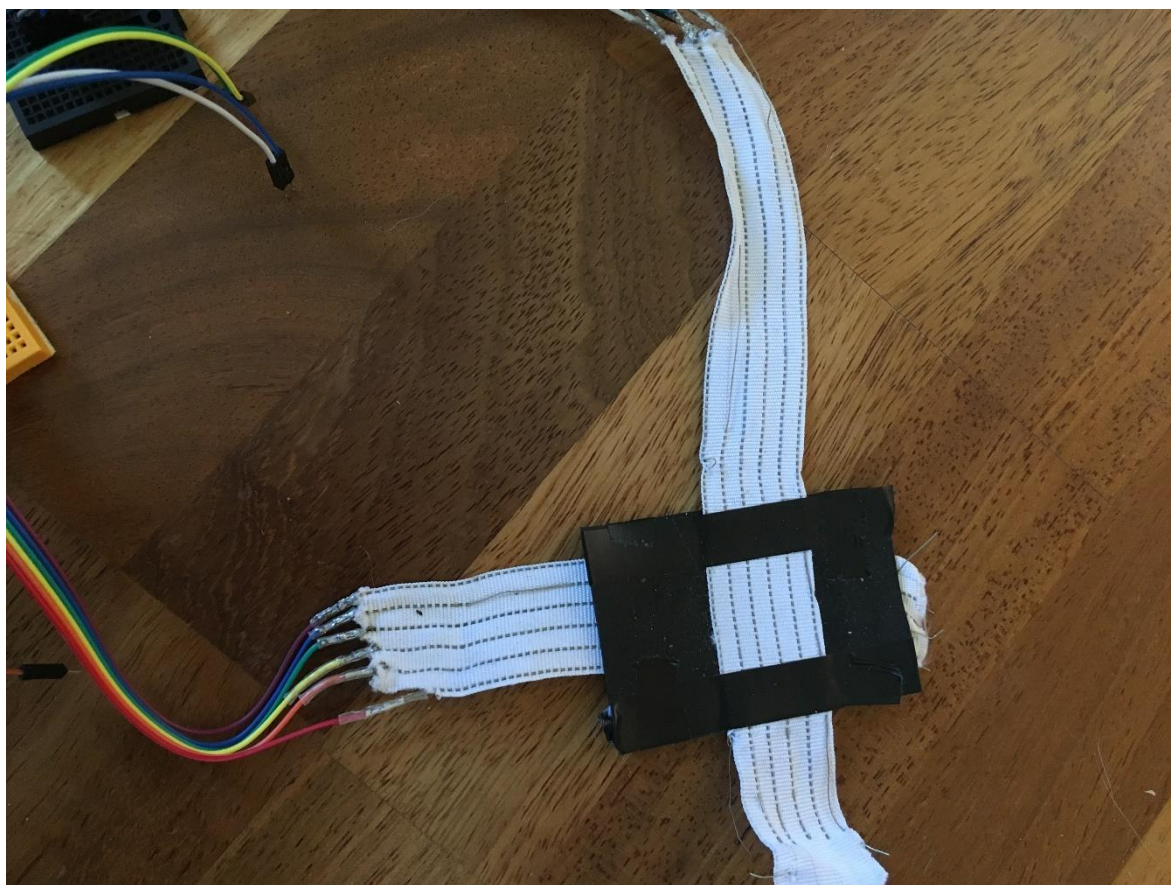
42. SDFileSystem API [Võrgumaterjal] [Vaadatud: 20. märts 2018]
<https://os.mbed.com/handbook/SDFileSystem>

Lisad

Lisa 1 – Niidiga talla prototüüp

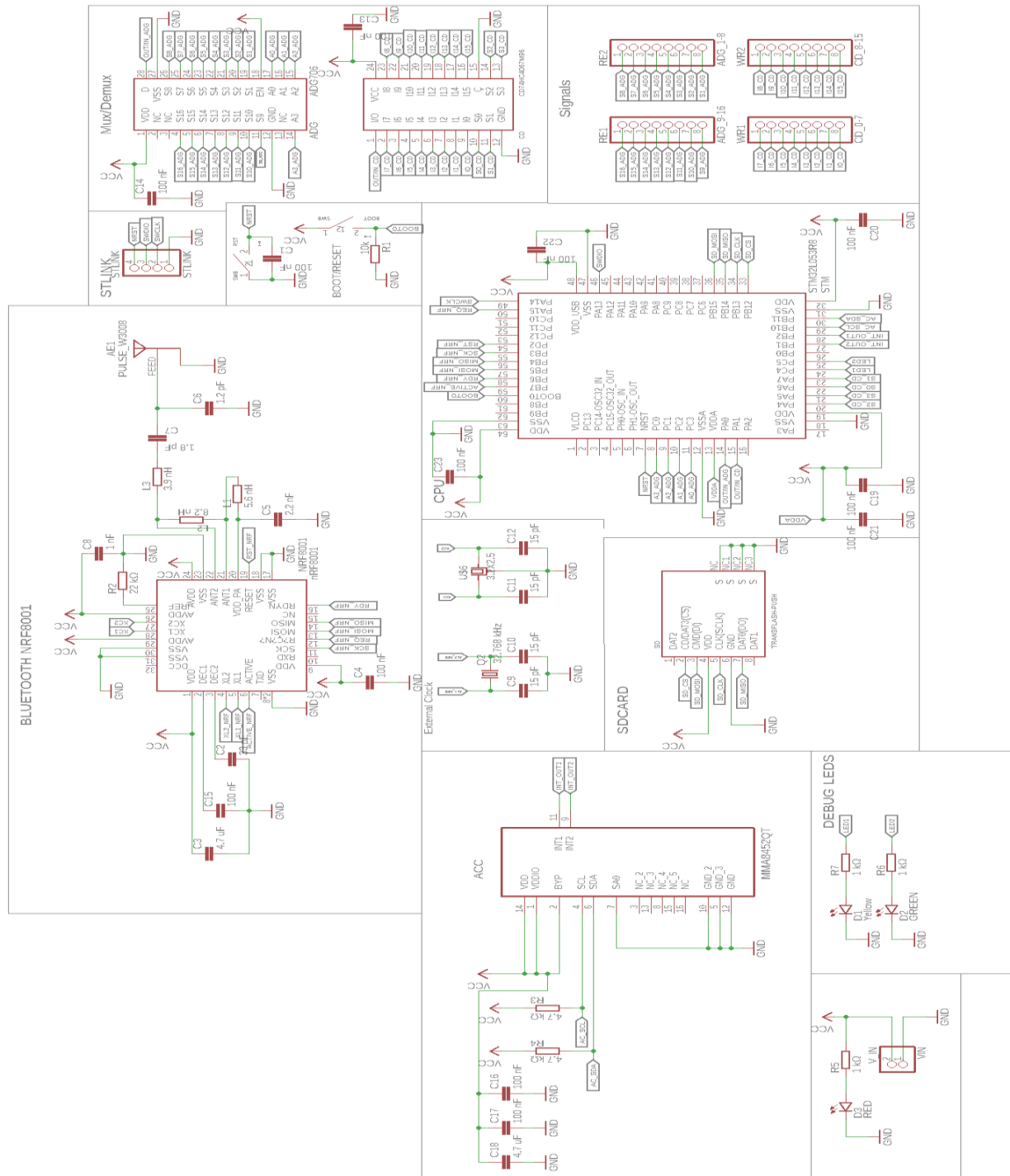


Lisa 2 – hõbetatud vasktraadiga talla prototüüp

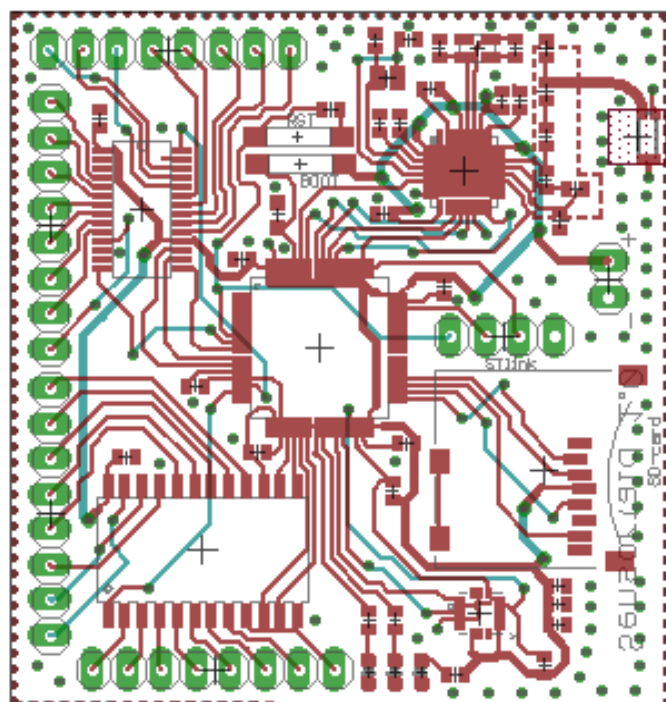


Lisa 3 – Juhtplaadi skeem

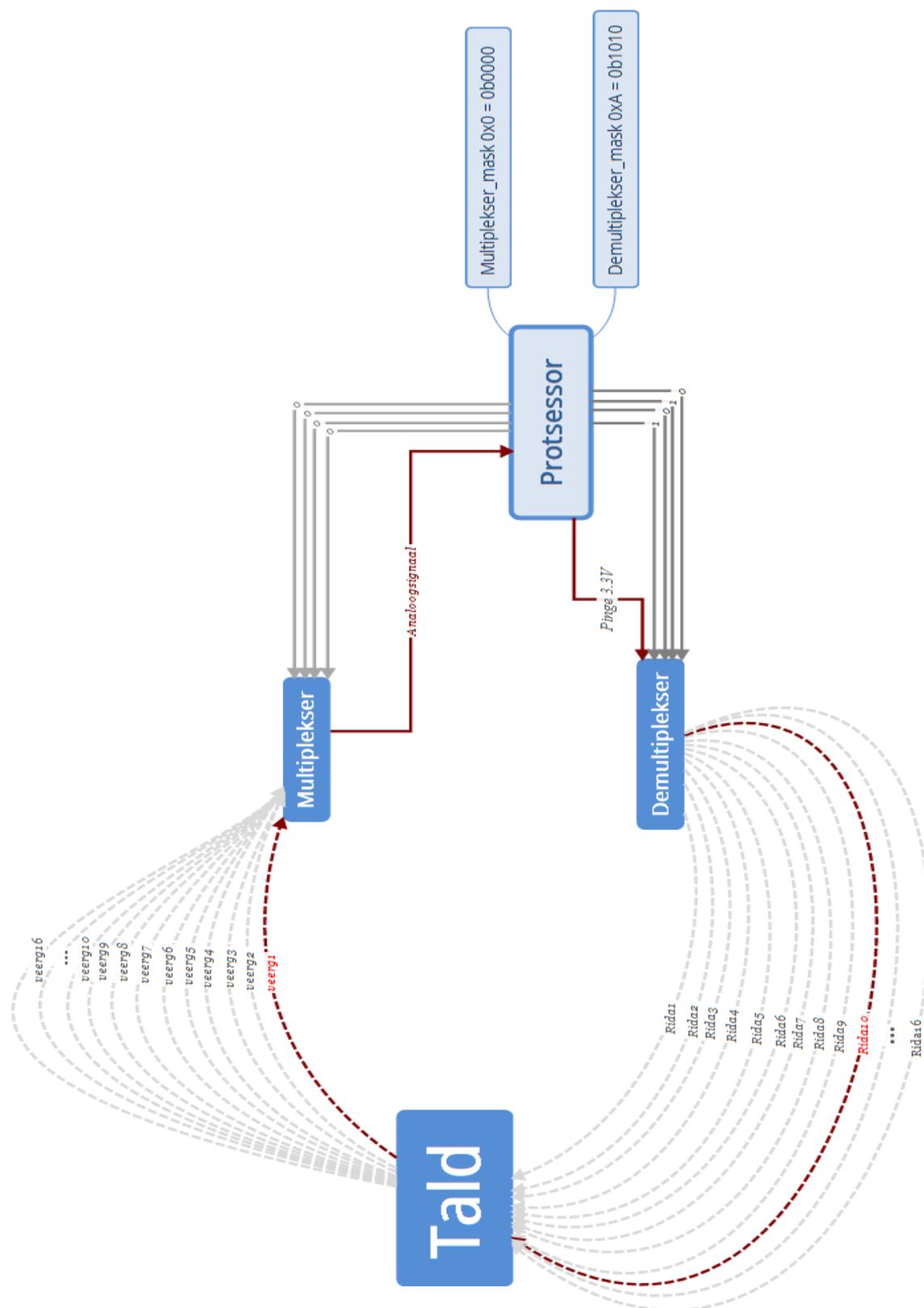
MARGO MARTIS_SENSORTALD



Lisa 4 – Juhtplaadi joonis



Lisa 5 – Ühe mõõtepunkti võtmine



Lihtlitsents lõputöö reprodutseerimiseks ja lõputöö üldsusele kättesaadavaks tegemiseks

Mina, Margo Martis

1. annan Tartu Ülikoolile tasuta loa (lihtlitsentsi) enda loodud teose

“ Takistusliku sensortalla 1.0 arendustöö ja testimine”

mille juhendajaks on Tarmo Tamm ja Teet Tilk

1.1. reprodutseerimiseks säilitamise ja üldsusele kättesaadavaks tegemise eesmärgil, sealhulgas digitaalarhiivi DSpace-is lisamise eesmärgil kuni autoriõiguse kehtivuse tähtaja lõppemiseni;

1.2. üldsusele kättesaadavaks tegemiseks Tartu Ülikooli veebikeskkonna kaudu, sealhulgas digitaalarhiivi DSpace'i kaudu kuni autoriõiguse kehtivuse tähtaja lõppemiseni.

2. olen teadlik, et punktis 1 nimetatud õigused jäävad alles ka autorile.
3. kinnitan, et lihtlitsentsi andmisega ei rikuta teiste isikute intellektuaalomandi ega isikuandmete kaitse seadusest tulenevaid õigusi.

Tartus, **19.05.2018**